第46卷 第7期
2023年7月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 7
Jul. 2023

# 基于RClimDex模型的近60 a中亚极端降水事件变化特征

黄 鑫[1]， 焦 黎[1]， 马晓飞[2]， 王勇辉[1]， 阿尔曼·阿布拉[1]

（1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院/新疆干旱区湖泊环境与资源重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室/中国科学院CA生态与环境研究中心，新疆 乌鲁木齐 830011）

**摘 要：**选取1960—2020年中亚126个气象站点逐日降水数据，基于RClimDex模型计算中亚8种极端降水指数，利用线性回归分析、Mann-Kendall法分析、相关性分析、小波变换和重标极差(R/S)分析，探究中亚极端降水事件特征。结果表明：(1) 近60 a中亚极端降水事件频率和强度均明显增加，表征降水强度(SDII)变化倾向率为0.02 $mm\cdot d^{-1}\cdot(10a)^{-1}$。极端降水量指数中，强降水量(R95p)、单日最大降水量(Rx1day)、连续5 d最大降水量(Rx5day)、年总降水量(PRCPTOT)的变化倾向率分别为1.93 $mm\cdot(10a)^{-1}$、0.24 $mm\cdot(10a)^{-1}$、0.66 $mm\cdot(10a)^{-1}$和0.73 $mm\cdot(10a)^{-1}$。在极端降水日指数中，中雨日数(R10)、持续干燥日数(CDD)、持续湿润日数(CWD)变化倾向率分别为0.02 $d\cdot(10a)^{-1}$、−0.65 $d\cdot(10a)^{-1}$和0.08 $d\cdot(10a)^{-1}$。极端降水存在明显的空间差异性和高海拔依赖性，高原和山区附近极端降水事件频发。中亚极端降水周期特征为多峰谱型，具有准5 a短周期振荡、6~9 a中周期振荡和10~15 a长周期振荡。(2) 极端降水指数与年总降水量具有良好的相关性，CWD对年总降水的贡献最大；太平洋年代际振荡(PDO)和北大西洋年代际振荡(AMO)对极端降水事件具有明显正相关性。R/S分析表明该地区极端降水特征未来持续可能性较大。研究结果可为中亚极端气候预测、自然环境保护、防灾减灾工作等提供科学依据。

**关 键 词：**极端降水；空间分布；相关分析；小波分析；中亚

**文章编号：**1000－6060(2023)07－1039－13(1039～1051)



极端降水事件是指在一定区域一定时间范围内降水量值超出其气候平均态，且达到或超出一定阈值的能够被监测和统计的小概率事件[1-2]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出：全球变暖导致全球极端降水事件发生频率和强度逐年提高[3-4]。大气和海洋升温、冰川融化、海平面上升、温室效应等现象明显增加[5]，加剧了全球各区域极端气候[6-7]。极端气候事件相较于气候平均态，对气候变化更敏感[8-9]。例如，1994—1995年、1998—2000年摩洛哥发生极端干旱事件，给当地造成巨大经济损失；2013年11月加拿大突发暴雨导致$30\times10^4$人受灾；2022年8月，美国加利福尼亚州东部“死亡谷”国家公园——地球上最热、最干燥的地方之一，因为暴雨致山洪暴发，公园遭到严重破坏，超千人被困公园。极端气候事件危害极大，造成人员和经济损失惨重，社会各界都对极端气候事件广泛关注。国内外专家学者对加拿大[9]、南美洲[10]、华南地区[11-12]、黄土高原[13]、西北地区[14]和青藏高原[15]等区域的降水和极端降水事件都进行了研究，表明南美洲、加拿大和中国西北干旱区、华南地区等地的

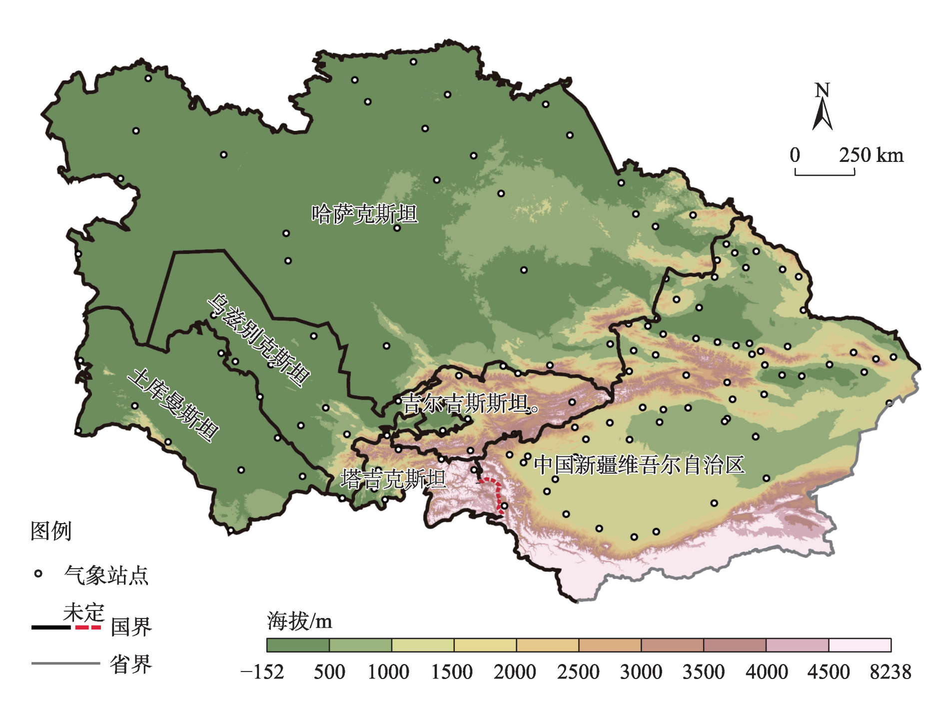
**收稿日期：**2022-10-09； **修订日期：**2022-12-29
**基金项目：**新疆区域协同创新专项项目(2022E01014)资助
**作者简介：**黄鑫(1999-)，女，硕士研究生，主要从事干旱区资源利用方面研究. E-mail: 610817654@qq.com
**通讯作者：**王勇辉(1977-)，男，博士，教授，主要从事干旱区资源利用方面研究. E-mail: wyhsd_3011@163.com

极端降水事件频率都有增加趋势。

中亚相比于东亚和欧洲地区不同，其气候系统格局独特[16-17]，位于我国的天气气候上游区，对全球气候变化响应更为敏感[18-20]。然而，因为中亚地理位置特殊和经济发展落后，对极端降水的关注度和研究的能力并不高[21-22]。复杂的地形地势和缺少地表植被覆盖易造成当地发生泥石流、山体滑坡、洪涝灾害等次生灾害，严重破坏自然地理环境和人类社会发展[23-24]。随着全球变暖，中亚地区的降水格局发生了变化，过去的研究表明：中亚整体降水呈现增长趋势，而不同区域又表现出差异性，其中中亚五国的降水量在减少，而新疆的降水量增加[25]。虽然降水量变化不同，但其极端降水事件发生概率总体呈现增长趋势[26]。新疆地区表现为年降水量和极端降水事件发生频率均增加，干旱天数逐年减少[27]。中亚极端降水的时空分异特征在空间分布上，西部少东部多[28]。极端降水在空间分异特征上呈现出多样性和异质性，受地形和地理位置影响较大[29]。目前，针对中亚极端降水事件的全面分析较少且所用资料年份较早，因此利用最新的资料和极端降水指数对中亚极端降水进行系统性评估具有重要意义。本研究选取中亚近60 a来126个地面气象站点的日降水序列，全面系统的分析中亚极端降水事件特征，同时预测中亚未来极端降水趋势，为中亚极端气候预测、自然环境保护、防灾减灾工作和人类生产生活等提供科学依据。

## 1 研究区概况

中亚指亚洲中部内陆地区(46°~96°E和34°~55°N)，包括哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦和中国新疆维吾尔自治区。该区远离海洋，气候干燥，是全球主要的干旱区之一。中亚西部濒临世界最大的内流湖——里海，东临西天山，南邻阿富汗和伊朗，北邻俄罗斯(图1)[30]。中亚地势东高西低，北部主要分布哈萨克斯坦丘陵和图兰平原，东南部是帕米尔高原和天山山脉，中部主要是山地丘陵，西部则为荒漠。中亚深入大陆腹地且远离海洋，隆起的天山山脉和帕米尔高原阻挡了海洋水汽的进入，使得中亚受海洋影响极少，形成了典型的温带沙漠、草原的大陆性气候[31]。中亚的地理位置特殊，经济发展缓慢，雨水稀少，极其干燥，水资源短缺，生态系统脆弱，极端降水事件危害极大[32]。




注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 中亚研究区及气象站点分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Central Asia research area and distribution of meteorological stations

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

中亚五国(哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦)站点资料选自美国国家海洋大气局的全球地面综合表面小时(ISH)降水数据(https://www.ncei.noaa.gov/metadata/geoportal/rest/metadata/item/ec4af8ce752a4898b308687c8c18351f/html),新疆地区64个气象站点资料来自中国地面气象站点资料(https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=230)。本研究所用的站点资料时间段均为1960—2020年。

中亚五国气象站点日降水资料存在很大范围的缺测,遵循数据连续、均一和完整的前提,初步统计分析后,保证五国都有站点同时缺测率不高于25%,大于50 a的有效数据,最终从中亚五国的599个站点中选取了降水观测数据质量相对较好的62个站点进行分析(吉尔吉斯斯坦7个,缺测率均不超过20%;哈萨克斯坦26个,缺测率都小于12%;塔吉克斯坦9个,缺测率不超过25%;土库曼斯坦10个,缺测率不超过10%;乌兹别克斯坦10个,缺测率不超过10%),并对这62个降水测点缺失的部分降水序列,用同一站点相邻年份对应日降水数据进行插补。

大尺度大气环流指数下载自美国国家海洋大气局的气候指数(https://psl.noaa.gov/data/climateindices/list/),包含1960—2020年的每月大气和海洋时间序列。

### 2.2 研究方法

本文选取世界气象组织(WMO)和气候变率与可预测性研究计划联合制定的极端气候指数中的8种极端降水指数(http://etccdi.pacificclimate.org/),其具体名称及定义如表1所示,这些指数广泛应用于极端降水的研究[1]。利用加拿大气象研究中心开发的RclimDex软件计算中亚各站点极端降水指数[33-34]。

利用一元线性气候回归分析方法分析8个极端降水指数的时间序列的变化趋势,当趋势变化率为正表示气候要素呈现增加的趋势,反之,则下降[35-36]。通过Mann-Kendall法分析极端降水指数时间序列的趋势和突变情况[37-38]。利用ArcGIS软件制作中亚极端降水趋势系数空间分布图,探究中亚极端降水空间分布变化。利用Morlet小波分析研究极端降水指数的周期性规律[39]。运用相关性分析探究中亚极端降水指数与年总降水量和大尺度大气环流指数的关系[38]。利用重标极差(R/S)分析,计算Hurst指数和分形维数($D$)并结合中亚各极端降水指数的历史变化,判读其未来极端降水指数的变化趋势,从而得出中亚极端降水事件未来的分形特征[12,40],R/S分析是专家Hurst针对尼罗河地区提出的处理时间序列的分形结构分析方法[41],学者们常用来分析时间序列的分形特征。国内外学者研究降水、气温、树木年轮、太阳黑子等结果表明均具有Hurst效应,对于此类序列,R/S分析方法具有独特作用[42-43]。

## 3 结果与分析

### 3.1 中亚极端降水指数时间变化特征

1960年以来,CDD小幅下降,变化倾向率为$-0.65\ d\cdot(10a)^{-1}$;CWD显著上升,变化倾向率为$0.08\ d\cdot(10a)^{-1}$,通过0.01显著性水平检验(图2a~b)。PRCPTOT和R10变化倾向率分别为$0.73\ mm\cdot(10a)^{-1}$和

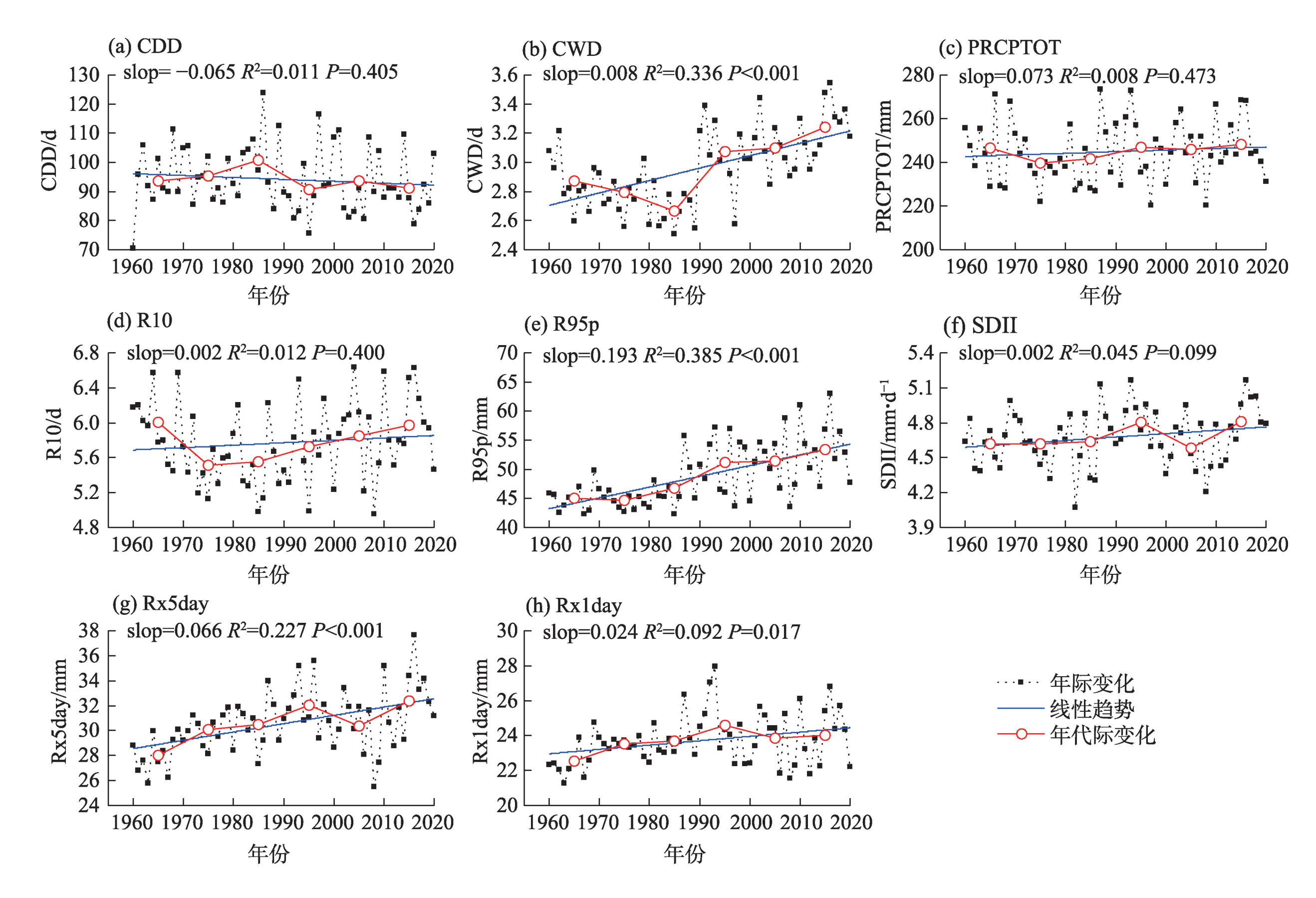
表1 极端降水指数定义

Tab. 1 Definition of extreme precipitation index

| 类别 | 分类 | 名称 | 定义 | 代码 |
|---|---|---|---|---|
| 极端降水指数 | 降水量指数 | 年总降水量/mm | 日降水量≥1 mm的降水总量 | PRCPTOT |
| | | 连续5 d最大降水量/mm | 连续5 d最大降水量 | Rx5day |
| | | 强降水量/mm | 日降水量>95%分位值的累积降水量 | R95p |
| | | 降水强度/$mm\cdot d^{-1}$ | 单日降水量≥1 mm的总量与总天数之比 | SDII |
| | | 单日最大降水量/mm | 每月最大单日降水量 | Rx1day |
| | 降水日指数 | 持续干燥日数/d | 日降水量<1 mm的最长连续天数 | CDD |
| | | 持续湿润日数/d | 日降水量≥1 mm的最长连续天数 | CWD |
| | | 中雨日数/d | 每年日降水量≥10 mm的总天数 | R10 |

0.02 d·(10a)$^{-1}$，两者升幅较小，未通过0.01显著性水平检验(图2c~d)。R95p显著上升，变化倾向率为1.93 mm·(10a)$^{-1}$，通过0.01显著性水平检验(图2e)。SDII小幅上升，变化倾向率为0.02 mm·d$^{-1}$·(10a)$^{-1}$，未通过0.01显著性水平检验(图2f)。Rx5day和Rx1day的变化倾向率分别为0.66 mm·(10a)$^{-1}$和0.24 mm·(10a)$^{-1}$，其中Rx5day升幅较大，通过0.01显著性水平检验(图2g~h)。

据年代际变化来看(图2、表2)，20世纪60年代以来，中亚的极端降水事件年代际变化与年际变化趋势相似。极端降水量指数中，PRCPTOT在20世纪80年代达到最高值319.963 mm，之后出现小幅下降；SDII从20世纪60年代开始波动变化，于21世纪10年代达到最高值4.810 mm·d$^{-1}$；Rx5day、Rx1day和R95p从20世纪60年代开始小幅波动增长，并于21世纪10年代达到最高值。极端降水日指数中，R10在20世纪70年代小幅回落，后持续增加，在21世纪10年代其值达到5.973 d；CWD从20世纪60年代波




注：slope为各极端降水指数线性倾向率；$R^2$为决定系数；CDD、CWD、PRCPTOT、R10、R95p、SDII、Rx5day、Rx1day分别为持续干燥日数、持续湿润日数、年总降水量、中雨日数、强降水量、降水强度、连续5 d最大降水量、单日最大降水量。下同。

图2 1960—2020年中亚极端降水指数线性趋势

Fig. 2 Linear trends of extreme precipitation indices in Central Asia from 1960 to 2020

**表2 中亚极端降水指数年代际变化**

**Tab. 2 Interdecadal variation of extreme precipitation indices in Central Asia**

| 年代 | PRCPTOT/mm | SDII/mm·d$^{-1}$ | Rx5day/mm | Rx1day/mm | R95p/mm | R10/d | CWD/d | CDD/d |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20世纪60年代 | 246.631 | 4.620 | 28.043 | 22.541 | 45.020 | 6.004 | 2.874 | 93.503 |
| 20世纪70年代 | 239.754 | 4.621 | 30.115 | 23.531 | 44.682 | 5.521 | 2.802 | 95.370 |
| 20世纪80年代 | 319.963 | 4.642 | 30.464 | 23.692 | 46.821 | 5.552 | 2.661 | 100.741 |
| 20世纪90年代 | 246.882 | 4.802 | 32.046 | 24.581 | 51.216 | 5.730 | 3.080 | 90.642 |
| 21世纪初 | 269.637 | 4.583 | 30.353 | 23.870 | 51.656 | 5.854 | 3.101 | 93.623 |
| 21世纪10年代 | 248.254 | 4.810 | 32.350 | 24.000 | 53.817 | 5.973 | 3.243 | 91.131 |

动上升，并于21世纪10年代达到最高值3.243 d；CDD从20世纪60年代开始增加，后于20世纪80年代达到最高值100.741 d，之后的30 a里波动变化，最终下降到91.131 d。总的来说，中亚1960—2020年极端降水事件呈较为明显的增长趋势。

### 3.2 中亚极端降水指数空间变化趋势

中亚44个测站的CDD表现出上升趋势，其中20个站点的上升趋势通过了95%显著性水平检验，显著上升站点主要分布在西部荒漠地区，山地附近和帕米尔高原东部站点CDD出现大幅下降趋势，即山地和高原出现显著变湿现象(图3a)。89个测站CWD逐年增多，31个站点显著上升，主要位于哈萨克斯坦丘陵和天山山地以及帕米尔高原(图3b)。PRCPTOT与R10变化趋势相似，62%左右的测站PRCPTOT和R10呈上升趋势，显著上升趋势的测站主要分布在新疆北疆的青河、乌鲁木齐、昌吉等测站以及南疆的和田、喀什等地，山地和高原显著增加趋势非常明显(图3c~d)。96个测站R95p逐年上升，其中36个站点通过置信度为95%的显著性检验，最大上升幅度达每年0.8 mm，主要位于新疆北疆的伊犁河谷地带、哈萨克斯坦中部低山丘陵，高海拔地貌展现出对R95p增长的海拔依赖性(图3e)。SDII反映区域降水强度，69%测站SDII升高，其中哈萨克斯坦丘陵地区和天山山脉一带的19个站点显著上升(图3f)。SDII低值区集中在乌兹别克斯坦以及土库曼斯坦西部广大平原区，新疆的库尔勒也显著下降。SDII高值区基本分布于天山山脉一带，帕米尔高原西端有2个站点表现出显著增长趋势。Rx5day和Rx1day大体的趋势变化相似，中亚超过2/3的测站Rx5day和Rx1day呈现上升趋势，显著上升的区域主要分布在丘陵以及天山山地，同时山地的显著增加面积多于山地(图3g~h)。总的来说，中亚东南地区极端降水指数增加明显，其中呈现显著上升趋势的站点多靠近在哈萨克斯坦丘陵、天山山脉附近和帕米尔高原区，极端降水事件较少的主要是西部广大荒漠平原地区，极端降水的空间分布差异较大，海拔依赖性表现明显。

### 3.3 中亚极端降水指数周期分析

通过小波分析理论，借助Matlab 2018b计算出小波系数并绘制实部等值线图(图4)，分析中亚极端降水指数的Morlet连续复小波变换周期的变化规律。

由图4可知，极端降水指数均呈现多峰谱型，存在准5 a的振荡短周期、6~9 a振荡中周期和10~15 a的振荡长周期。其中，5 a左右等值线变化频繁，表明中亚地区在5 a左右的振荡周期里，极端降水存在较明显的波动，普遍出现“偏冷-偏暖”的5~7次振荡。CDD和CWD周期变化相似，主要存在10~15 a的变化周期，呈现多次冷暖交替振荡(图4a~b)。PRCPTOT主要为6~9 a的主周期振荡(图4c)；R10以准5 a振荡周期为第一主周期，表现出准5次冷暖交替；其中准8 a为第二主周期(图4d)。R95p、Rx1day的周期变化相似，5~7 a的振荡周期最显著，为第一主周期，具有全域性，其次为准10 a的第二主周期，短暂且具有局域性(图4e、h)。SDII和Rx5day周期变化类似，5~7 a的振荡周期最为显著，为第一主周期，其次是16~18 a周期振荡较为明显，为第二主周期(图4f~g)。

### 3.4 中亚极端降水指数与大气环流指数和年总降水量的关系

相关性分析(表3)发现：除CDD和R10以外，其他极端降水指数与年总降水量显著相关($P$<0.01)，其中CWD与年总降水量呈显著正相关($r$=0.601，$P$<0.01)，表明在中亚极端降水指数中CWD对年总降水量贡献率较大；Rx1day($r$=0.331，$P$<0.01)和SDII($r$=0.357，$P$<0.01)与年总降水量呈现较好的相关性，通过了0.01的显著性水平检验；R95p($r$=0.265，$P$<0.05)和Rx5day($r$=0.313，$P$<0.05)与年总降水量相关性也通过了$P$=0.05的显著性水平检验。上述表明，1960—2020年中亚年总降水量中极端降水的比例呈现增加趋势。

选取了26个大气环流指数计算其与中亚极端降水指数进行相关性检验，最终选出东亚/俄罗斯西部振荡指数(EA)、北大西洋涛动(NAO)、北大西洋年代际振荡(AMO)、太平洋年代际振荡(PDO)、北方涛动(NOI)、北极涛动(AO)、南方涛动(SOI)7个相关性较好的大气环流指数(表3)。结果表明，AMO与除CDD以外的极端降水指数均呈正相关，其中与CWD($r$=0.607，$P$<0.01)、R95p($r$=0.528，$P$<0.01)和R10($r$=0.432，$P$<0.01)呈显著正相关，表明AMO对中亚极端降水有明显的影响。PDO与除CDD以外的极端降水指数均呈正相关，其中与PRCPTOT($r$=0.297，$P$<0.05)、SDII($r$=0.426，$P$<0.01)、R95p($r$=0.329，$P$<0.01)、Rx5day($r$=0.520，$P$<0.01)和

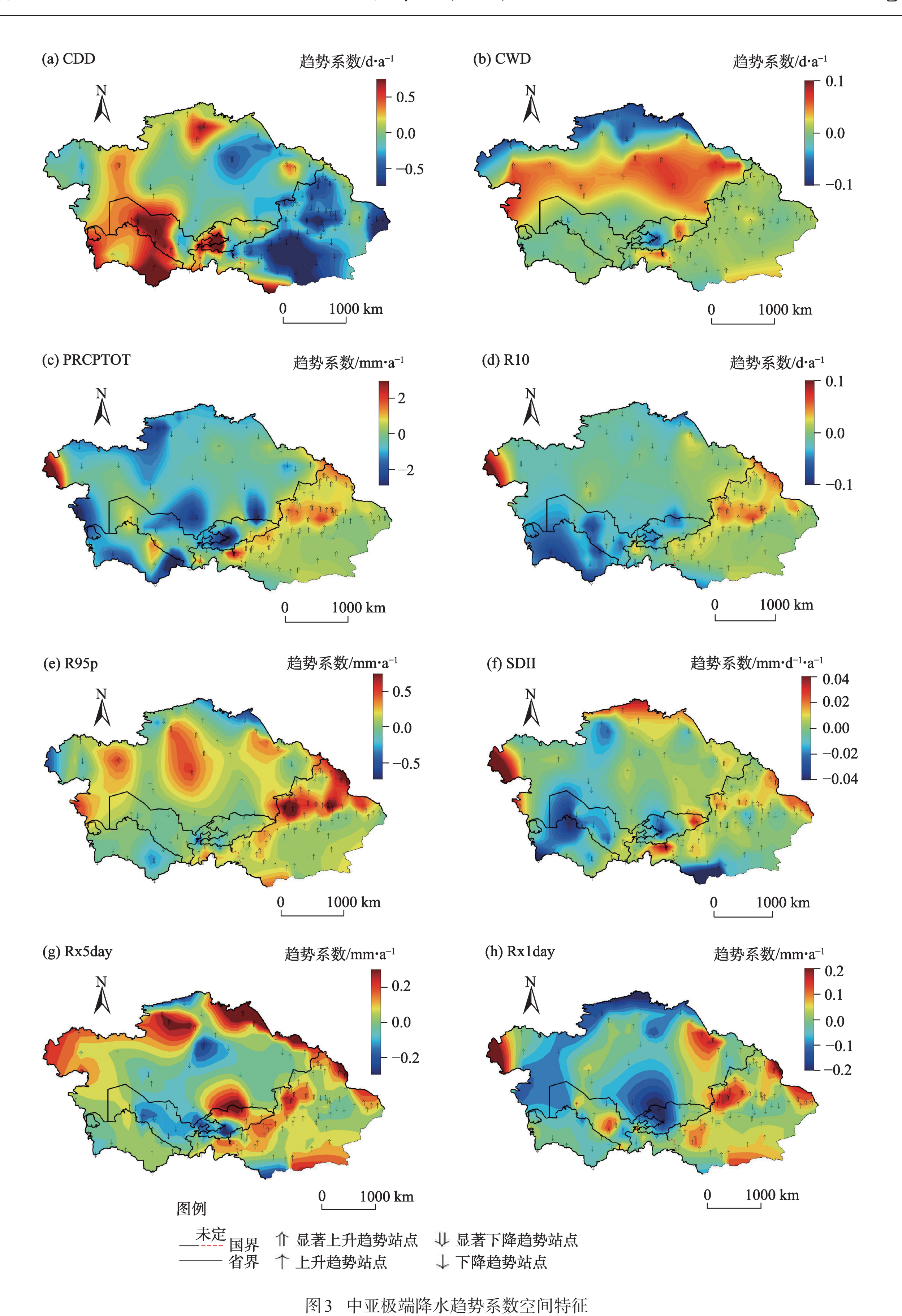



图3 中亚极端降水趋势系数空间特征

Fig. 3 Spatial characteristics of extreme precipitation trend coefficients in Central Asia

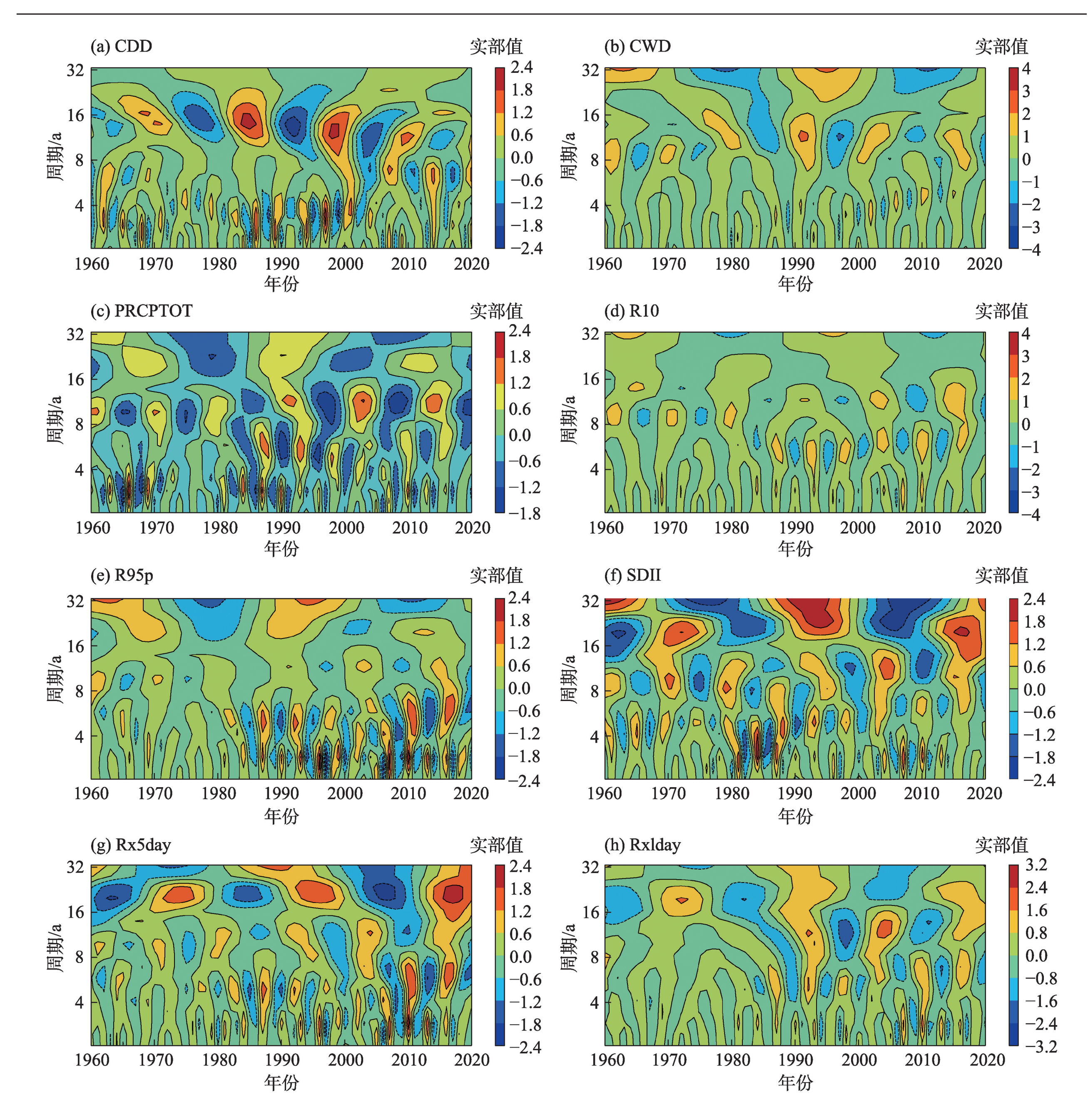



图4　1960—2020年中亚极端降水事件的小波分析

Fig. 4　Wavelet analysis of extreme precipitation events in Central Asia from 1960 to 2020

Rx1day($r$=0.511，$P$<0.01)显著相关。EA与各极端降水指数相关性也较好，与CWD($r$=−0.408，$P$<0.01)、R95p($r$=−0.434，$P$<0.01)和Rx5day($r$=−0.308，$P$<0.05)呈显著负相关。

### 3.5　中亚极端降水未来变化趋势

R/S分析可以判断时间序列遵从随机游走还是有偏的随机游走过程，结合趋势变化判断中亚极端降水未来的突变特征和持续性，能够以定性角度分析序列过去与未来是否存在相同或相反的变化特征。若Hurst指数>0.5、$D$<1.5，序列保持长期记忆性，未来的增量和过去的增量相似，继续保持目前趋势的可能性强；若Hurst指数<0.5、$D$>1.5很有可能是记忆的转弱，趋势结束和反转的开始；若Hurst指数=0.5、$D$=1.5，序列接近随机游走，无定向运动[43-44]。各极端降水指数的Hurst指数都大于0.5、$D$都小于1.5，表示其变化特征持续现有趋势可能性较大(表4)。即：PRCPTOT、R10、R95p、Rx1day、Rx5day、SDII和CWD各极端降水指数将持续增加，且持续性较

表3 1960—2020年极端降水指数与大气指数和年总降水量的相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between extreme precipitation indices and annual total precipitation and atmospheric circulation in Central Asia from 1960 to 2020

| 指数 | 相关系数(r) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CDD | CWD | PRCPTOT | R10 | R95p | SDII | Rx5day | Rx1day |
| AO | 0.117 | 0.141 | −0.094 | −0.269* | 0.016 | −0.033 | 0.068 | 0.019 |
| AMO | −0.294* | 0.607** | 0.032 | 0.432** | 0.528** | 0.212 | 0.219 | 0.065 |
| NAO | 0.072 | 0.061 | 0.004 | −0.129 | 0.031 | 0.142 | 0.194 | 0.171 |
| PDO | −0.100 | 0.102 | 0.297* | 0.235 | 0.329** | 0.426** | 0.520** | 0.511** |
| SOI | 0.089 | −0.098 | −0.132 | −0.203 | −0.122 | −0.199 | −0.244 | −0.330** |
| EA | 0.156 | −0.408** | −0.112 | −0.186 | −0.434** | −0.195 | −0.308* | −0.117 |
| ONI | −0.113 | 0.097 | 0.108 | 0.297* | 0.089 | 0.166 | 0.183 | 0.238 |
| PRCPTOT | −0.131 | 0.601** | - | 0.192 | 0.265* | 0.357** | 0.313* | 0.331** |

注:*、**分别表示在$P<0.05$、$P<0.01$水平上显著。

表4 极端降水事件变化的Hurst指数和分形维数(*D*)

Tab. 4 Hurst index and fractal dimension (*D*) of extreme precipitation event change

| 指数 | CDD | CWD | PRCPTOT | R10 | R95p | SDII | Rx5day | Rx1day |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Hurst | 0.564 | 0.993 | 0.707 | 0.772 | 0.989 | 0.679 | 0.843 | 0.763 |
| *D* | 1.436 | 1.007 | 1.293 | 1.228 | 1.011 | 1.321 | 1.157 | 1.237 |

强;而CDD将继续减少,但其持续性一般。

## 4 讨论

极端降水事件频发给世界各地造成了严重的经济和人员损失,社会各界都对其有着广泛关注。中亚区域整体极端降水事件呈逐年增长的趋势,且这一趋势还可能持续[31-32]。中亚植被稀少,极度干燥,自然环境恶劣,导致当地生态系统十分脆弱,突发的极端降水事件会对中亚的自然环境和农业生产等造成严重不良影响[30]。

中亚东南地区极端降水指数增加明显,其中呈现显著上升趋势的站点多靠近在山地和高原区域,这与Liu等[45]发现中亚地区极端降水重现期除东北部有降低趋势外,东南部地区极端降水事件的重现期最高的结论一致性较高。总的来说,中亚极端降水的空间分布差异较大,海拔依赖性表现明显。陈亚宁等[46]指出天山地区蒸发剩余比达到94.39%,大气变暖变湿导致天山山区水分和降水循环增加,在过去20 a间中亚天山地区的降水循环持续加速,从而造就中亚极端降水空间分布的不均衡性格局。高洁等[47]指出中亚水汽输送西部较之东部减少而西北部和南部以及高原山区水汽收支增加。

随着全球大气变暖,蒸散发强烈,大气中水分增多,极端降水事件频率增多[48],同时大气环流NAO在气候基本态和年代际的尺度上对整个西北干旱区降水的调控起到重要作用[49]。相关研究表明:高、中、低纬系统和中亚低值系统的活跃,使得新疆地区的降水年代际和年际极端现象增多[50-51]。NAO的位相变化受AMO的影响,改变中亚的降水格局[52]。同时PDO和AMO也会共同影响印度夏季风的强度和“丝绸之路”遥相关,进而影响中亚降水格局[53-55]。PDO和AMO均是影响中亚极端降水突变的主要气候系统内部变率模态。基于Jiang等[56]研究认为,PDO正位相期间,热带太平洋海温异常通过调控高低层大气环流和水汽输送引起中亚降水显著增多,影响中心主要集中于中亚南部和东南部。AMO暖位相期间激发沿西风急流向东传播的准定长波列,从而影响中亚北部极端降水。此外,人为活动可以通过动力(即大气环流的变化)和热力作用(即伴随温度升高大气水汽含量的增加)令中亚夏季降水增加[57]。除此之外,太阳黑子[58]、地形[59]和纬度[60]等因素也对极端降水变化造成一定程度的影响。东亚振荡指数与中亚极端降水指数表现为负相关。周天军等[61]研究表明人为气溶胶

强迫所使得东亚大陆变冷、海陆温差减低、大气稳定度增加，进而可能对中亚极端降水格局产生影响，具体物理机制还需进一步研究。

综上所述，随着全球气候变暖，大量的研究均表明中亚极端降水逐年增长[28]的态势，但中亚各地区单元增加强度不同，区域之间具有空间差异性[29]，表明区域极端降水对气候变暖的响应的影响因素复杂且具有差异性。中亚及其内部区域的极端降水的变化，受到中纬度大气中的水汽含量和西风环流强弱变化的影响很大，但是全球气候变暖对中亚极端降水的影响以及区域差异及其影响因素，仍然需要进一步探究。

本文以气象站点观测资料为基础，分析了中亚近60 a来的极端降水时空分布特点，可以为中亚生态环境保护和防灾减灾等工作提供参考依据。但是，中亚五国的数据质量参差不齐，而选取降水序列的要求较严格，因此可能有一些气象站点被剔除，未来需一些新的方法来高效处理类似降水序列缺失地区的数据。研究中把极端降水作为一个整体来研究，未能将极端降雨或极端降雪事件单独进行讨论，同时对暖季和冷季的差异性没能深入探究，后续还需进一步探究极端降雨和极端降雪的差异性及对不同灾害事件的影响。

## 5　结　论

本文选取1960—2020年中亚126个站点日降水序列，基于RClimDex模型计算中亚8种极端降水指数，探究中亚极端降水事件规律及驱动因素，得出以下主要结论：

（1）时间上，近60 a中亚极端降水事件呈现较明显增加趋势，SDII的变化倾向率为0.02 mm·d$^{-1}$·(10a)$^{-1}$；极端降水量指数（R95p、Rx1day、Rx5day、PRCPTOT）的变化倾向率分别为1.93 mm·(10a)$^{-1}$、0.24 mm·(10a)$^{-1}$、0.66 mm·(10a)$^{-1}$和0.73 mm·(10a)$^{-1}$；在极端降水日指数（R10、CDD、CWD）中，除CDD呈下降趋势外，其他指数也呈弱上升趋势，其变化倾向率分别为0.02 d·(10a)$^{-1}$、−0.65 d·(10a)$^{-1}$和0.08 d·(10a)$^{-1}$。周期变化上，中亚各项极端降水指数呈现多峰谱型，存在准5 a的振荡短周期、6~9 a振荡中周期和10~15 a的振荡长周期。其中，5 a左右等值线变化频繁，普遍出现“偏冷-偏暖”的多次振荡。

（2）空间上，中亚极端降水存在明显的高海拔依赖性。中亚绝大部分站点CDD表现出下降趋势，CWD呈上升趋势，各地区变化差异明显。R10与PRCPTOT变化趋势相似，山地和高原测站显著上升。绝大部分测站R95p呈上升趋势，新疆伊犁河谷地带和哈萨克斯坦中部低山丘陵上升趋势显著。Rx1day和Rx5day整体的趋势变化相似，呈现上升趋势。SDII大部分地区呈现显著上升趋势，高值区集中于天山山脉和帕米尔高原西端。

（3）中亚近60 a的年总降水量与大部分极端降水指数（除CDD、R10）均表现出显著相关性，其中CWD与年总降水量呈显著正相关（$r$=0.601，$P$<0.01），表明在中亚极端降水指数中CWD对年总降水量贡献率较大。除CDD以外，PDO和AMO与极端降水指数均呈正相关。PDO和AMO均是影响中亚极端降水突变的主要气候系统内部变率模态。R/S分析表明PRCPTOT、R10、R95p、Rx1day、Rx5day、SDII和CWD等指数未来将持续增加可能性较大，且持续性较强，CDD未来可能仍将呈下降趋势，但其持续性一般。

## 参考文献（References）


[1] 田亚林. 中亚地区极端降水时空分布及重现期分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020. [Tian Yalin. Research on temporal-spatial variations of extreme precipitation in Central Asia and its return period[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020. ]

[2] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2006, 111(D5): D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

[3] Zhang Q, Li J, Singh V P, et al. Spatio-temporal relations between temperature and precipitation regimes: Implications for temperature-induced changes in the hydrological cycle[J]. Global and Planetary Change, 2013, 111: 57−76.

[4] 韩振宇, 陆波, 石英, 等. IPCC AR6报告关于气候变化影响和风险主要结论的解读[J]. 气候变化研究(自然科学版), 2022, 18(4): 389−394. [Han Zhenyu, Lu Bo, Shi Ying, et al. Interpretation of the IPCC AR6 on the impacts and risks of climate change[J]. Climate Change Research (Natural Science Edition), 2022, 18(4): 389−394. ]

[5] Zhou T. New physical science behind climate change: What does IPCC AR6 tell us?[J]. Innovation (Camb), 2021, 2(4): 100173, doi: 10.1016/j.xinn.2021.100173.

[6] Zarekarizi M, Rana A, Moradkhani H. Precipitation extremes and their relation to climatic indices in the Pacific northwest USA[J].

Climate Dynamics, 2018, 50(11-12), doi: 10.1007/s00382-017-3888-2.

[7] 顾西辉, 张强, 张生. 1961—2010年中国农业洪旱灾害时空特征成因及影响[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 439-447. [Gu Xihui, Zhang Qiang, Zhang Sheng. Spatio-temporal properties of flood/drought hazards and possible causes and impacts in 1961—2010[J]. Earth Science, 2016, 36(3): 439-447. ]

[8] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages[J]. Climatic Change, 1992, 21(3): 289-302.

[9] Stone D A, Weaver A J, Zwiers F W. Trends in Canadian precipitation intensity[J]. Atmosphere-Ocean, 2000, 38(2): 321-347.

[10] Aguilar E, Peterson T C, Obando P R, et al. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961—2003[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres: JGR, 2005, 110(D23): D23107, doi: 10.1029/2005JD006119.

[11] 戴声佩, 罗红霞, 李茂芬, 等. 1959—2016年华南地区极端降水事件变化特征[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(3): 128-142. [Dai Shengpei, Luo Hongxia, Li Maofen, et al. Extreme precipitation events variations in southern China from 1959 to 2016[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(3): 128-142. ]

[12] 何慧, 陆虹, 陈思蓉. 1961—2010年华南极端降水日数的时空变化特征[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7256-7259, 7276. [He Hui, Lu Hong, Chen Sirong. Temporal-spatial variation characteristics of the extreme precipitation days over south China from 1961 to 2010[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(12): 7256-7259, 7276. ]

[13] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961—2007年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299. [Li Zhi, Zheng Fenli, Liu Wenzhao. Analyzing the spatial-temporal changes of extreme precipitation events in the Loess Plateau from 1961 to 2007[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 291-299. ]

[14] 王少平, 姜逢清, 吴小波, 等. 1961—2010年西北干旱区极端降水指数的时空变化分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 318-326. [Wang Shaoping, Jiang Fengqing, Wu Xiaobo, et al. Temporal and spatial variability of the extreme precipitation indices over the arid regions in northwest China from 1961 to 2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 318-326. ]

[15] 马伟东, 刘峰贵, 周强, 等. 1961—2017年青藏高原极端降水特征分析[J]. 自然资源学报, 2020, 35(12): 3039-3050. [Ma Weidong, Liu Fenggui, Zhou Qiang, et al. Characteristics of extreme precipitation over the Qinghai-Tibet Plateau from 1961 to 2017[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(12): 3039-3050. ]

[16] Lioubimtseva E, Henebry C M. Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability, and adaptations[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(11): 963-977.

[17] Li Z, Chen Y N, Fang G H, et al. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1316, doi: 10.1038/s41598-017-01473-1.

[18] Schiemann R, Lüthi D, Vidale P L, et al. The precipitation climate of Central Asia[J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(3): 295-314.

[19] Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, et al. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(5): 535-556.

[20] Bothe O, Fraedrich K, Zhu X H. Precipitation climate of Central Asia and the large-scale atmospheric circulation[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 108(3-4): 345-354.

[21] Dong W H, Lin Y L, Wright J S, et al. Summer rainfall over the southwestern Tibetan Plateau controlled by deep convection over the Indian subcontinent[J]. Science Foundation in China, 2016, 7: 10925, doi: 10.1038/ncomms10925.

[22] 韩云环, 马柱国, 杨庆, 等. 增暖背景下新疆昼夜降水的变化特征[J]. 气候与环境研究, 2014(6): 763-772. [Han Yunhuan, Ma Zhuguo, Yang Qing, et al. Characteristics of diurnal precipitation in Xinjiang under warming background[J]. Climatic and Environmental Research, 2014(6): 763-772. ]

[23] 刘晶, 周玉淑, 杨莲梅, 等. 伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J]. 大气科学, 2019, 43(5): 959-974. [Liu Jing, Zhou Yushu, Yang Lianmei, et al. A diagnostic study of water vapor during an extreme precipitation event in the Yili River valley[J]. Atmospheric Sciences, 2019, 43(5): 959-974. ]

[24] 谢泽明, 周玉淑, 杨莲梅. 新疆降水研究进展综述[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(3): 204-212. [Xie Zeming, Zhou Yushu, Yang Lianmei. Review of study on precipitation in Xinjiang[J]. Rainstorm Disaster, 2018, 37(3): 204-212. ]

[25] Hu Z Y, Zhou Q M, Chen X, et al. Variations and changes of annual precipitation in Central Asia over the last century[J]. International Journal of Climatology, 2017, 37: 157-170.

[26] Zhang M, Chen Y N, Shen Y J, et al. Changes of precipitation extremes in arid Central Asia[J]. Quaternary International, 2017, 436: 16-27.

[27] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S, et al. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960—2010[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(12): 1807-1818.

[28] 常石巧. 中亚干旱区极端降水事件的水汽来源及物理机制初探[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. [Chang Shiqiao. Preliminary study on moisture sources and physical mechanism of extreme precipitation events in the arid Central Asia[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. ]

[29] 张曼. 中亚地区气候极值时空变化特征及影响因素研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Zhang Man. Analysis of the characteristics on spatial-temporal variabilities and influence factors of climate extremes in Central Asia[D]. Beijing: University of Chi-

nese Academy of Sciences, 2018. ]

[30] 陆晴, 刘根林, 闫冰, 等. 气候变暖背景下中亚地区极端降水事件变化及其对植被覆盖的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(4): 226-235, 243. [Lu Qing, Liu Genlin, Yan Bing, et al. Variation of extreme precipitation events and their impacts on vegetation coverage in Central Asia under climate warming[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 226-235, 243. ]

[31] 江洁. 中亚降水长期变化分析和归因研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021. [Jiang Jie. Analysis and attribution of long-term precipitation change in Central Asia[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. ]

[32] 姚俊强, 曾勇, 李建刚, 等. 中亚区域干湿及极端降水研究综述[J]. 气象科技进展, 2020, 10(4): 7-14. [Yao Junqiang, Zeng Yong, Li Jiangang, et al. A review of dry-wet climate change and extreme precipitation in Central Asia[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(4): 7-14. ]

[33] 陈昌春, 张余庆, 王腊春, 等. 基于RClimDex模型的江西省极端降水时空变化研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(11): 41-45. [Chen Changchun, Zhang Yuqing, Wang Lachun, et al. Research on the change of extreme precipitation in Jiangxi Province based on RClimDex model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2013 (11): 41-45. ]

[34] 高丹阳, 游如玥, 朱虹, 等. 基于RClimDex模型的四川省极端降水时空变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(8): 10-13. [Gao Danyang, You Ruyue, Zhu Hong, et al. Spatiotemporal variation characteristics of extreme precipitation in Sichuan Province based on RClimDex model[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(8): 10-13. ]

[35] 黎晓东, 王永强, 刘万, 等. 三江源典型地区1967—2019年降水时空演变特征[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(1): 16-22. [Li Xiaodong, Wang Yongqiang, Liu Wan, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of precipitation in typical areas at the source of three rivers from 1967 to 2019[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(1): 16-22. ]

[36] 魏军, 李婷, 胡会芳, 等. 基于RClimDex模型的石家庄市极端降水时空变化特征[J]. 干旱气象, 2016, 34(4): 623-630. [Wei Jun, Li Ting, Hu Huifang, et al. Temporal and spatial variation characteristics of extreme precipitation based on RClimDex model in Shijiazhuang during 1972—2014[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(4): 623-630. ]

[37] 王兴梅, 张勃, 戴声佩, 等. 甘肃省黄土高原区夏季极端降水的时空特征[J]. 中国沙漠, 2011, 31(1): 223-229. [Wang Xingmei, Zhang Bo, Dai Shengpei, et al. Spatial and temporal characteristics of summer extreme precipitation in Loess Plateau of Gansu Province China[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(1): 223-229. ]

[38] 张秀娟, 李传浩, 卜庆雷, 等. 1961年—2016年鲁中地区极端降水时空变化特征及与ENSO关系研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(3): 67-72. [Zhang Xiujuan, Li Chuanhao, Bu Qinglei, et al. Spatial-temporal variation characteristics of extreme precipitation and its relationship with ENSO in central Shandong from 1961 to 2016[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(3): 67-72. ]

[39] 白宇轩, 杜军, 王挺, 等. 1971—2020年藏东南极端降水指数的时空变化特征[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(3): 31-40. [Bai Yuxuan, Du Jun, Wang Ting, et al. Spatio-temporal change of extreme precipitation index of southeastern Tibet from 1971 to 2020 [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2022, 42(3): 31-40. ]

[40] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与R/S方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 811-820. [Pan Yajing, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis[J]. Geographical Research, 2012, 31(5): 811-820. ]

[41] 黄勇, 周志芳, 王锦国, 等. R/S分析法在地下水动态分析中的应用[J]. 河海大学学报, 2002, 30(1): 83-87. [Huang Yong, Zhou Zhifang, Wang Jinguo, et al. Application of R/S method to dynamic groundwater analysis[J]. Journal of Hohai University, 2002, 30 (1): 83-87. ]

[42] 于延胜, 陈兴伟. R/S和Mann-Kendall法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008(3): 41-44. [Yu Yansheng, Chen Xingwei. Analysis of future trend characteristics of hydrological time series based on R/S and Mann-Kendall methods[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008 (3): 41-44. ]

[43] 陈昭, 梁静溪. 赫斯特指数的分析与应用[J]. 中国软科学, 2005 (3): 134-138. [Chen Zhao, Liang Jingxi. The analysis and application of Hurst exponent[J]. China Soft Science, 2005(3): 134-138. ]

[44] Zhou Y K. Characterizing the spatio-temporal dynamics and variability in climate extremes over the Tibetan Plateau during 1960—2012[J]. Journal of Resources and Ecology, 2019, 10(4): 397-414.

[45] Liu Y R, Liu Y P, Yang X, et al. Development of an integrated multivariate trend-frequency analysis method: Spatial-temporal characteristics of climate extremes under global warming for Central Asia[J]. Environmental Research, 2021, 195: 110859, doi: 10.1016/j.envres.2021.110859.

[46] 陈亚宁, 李稚, 方功焕. 中亚天山地区关键水文要素变化与水循环研究进展[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 1-8. [Chen Yaning, Li Zhi, Fang Gonghuan. Changes of key hydrological elements and research progress of water cycle in the Tianshan Mountains, Central Asia[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 1-8. ]

[47] 高洁, 赵勇, 姚俊强, 等. 气候变化背景下中亚干旱区大气水分循环要素时空演变[J]. 干旱区研究, 2022, 39(5): 1371-1384. [Gao Jie, Zhao Yong, Yao Junqiang, et al. Spatiotemporal evolution of atmospheric water cycle factors in arid regions of Central Asia under climate change[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5): 1371-1384. ]

[48] 李奇虎, 马庆勋. 1960—2010年西北干旱区极端降水特征研究[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1134-1138. [Li Qihu, Ma Qingxun. Extreme pecipitation features of arid regions in northwest of China[J]. Geographic Science, 2014, 34(9): 1134-1138. ]

[49] 闫炎, 赵昕奕, 周力平. 近50年中国西北地区干湿演变的时空特征及其可能成因探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 38-44. [Yan Yan, Zhao Xinyi, Zhou Liping. The temporal and spatial characteristics of aridity and wetness variation in northwest China during recent 50 years and the factor analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 38-44. ]

[50] 戴新刚, 汪萍, 张凯静. 近60年新疆降水趋势与波动机制分析[J]. 物理学报, 2013, 62(12): 1-11. [Dai Xingang, Wang Ping, Zhang Kaijing. A study on precipitation trend and fluctuation mechanism in northwestern China over the past 60 years[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(12): 1-11. ]

[51] 杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249-259. [Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxin. Atmospheric circulation characteristics of precipitation anomaly in arid regions in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249-259. ]

[52] Huang W, Chen J H, Zhang X J, et al. Definition of the core zone of the "westerlies-dominated climatic regime", and its controlling factors during the instrumental period[J]. Science China (Earth Sciences), 2015, 58(5): 676-684.

[53] Feng S, Hu Q. How the North Atlantic multidecadal oscillation may have influenced the Indian summer monsoon during the past two millennia[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(1): 548-562.

[54] Wei H, Chen F H, Feng S, et al. Interannual precipitation variations in the mid-latitude Asia and their association with large-scale atmospheric circulation[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(1): 3962-3968.

[55] Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian High and its influence on summer rainfall over China[J]. Climate Dynamics, 2014, 43(5-6): 1257-1269.

[56] Jiang J, Zhou T, Chen X, et al. Central Asian precipitation shaped by the tropical Pacific decadal variability and the Atlantic multidecadal variability[J]. Journal of Climate, 2021, 34(18): 7541-7553.

[57] Peng D D, Zhou T J, Zhang L X, et al. Detecting human influence on the temperature changes in Central Asia[J]. Climate Dynamics, 2019, 53: 4553-4568.

[58] 张强, 韩永翔, 宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展, 2005, 20(9): 990-998. [Zhang Qiang, Han Yongxiang, Song Lianchun. The summarize of development of global climate change and its effect factors[J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(9): 990-998. ]

[59] Yang P, Zhang Y Y, Xia J, et al. Investigation of precipitation concentration and trends and their potential drivers in the major river basins of Central Asia[J]. Atmospheric Research, 2020, 245: 105128, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105128.

[60] Shi Z G, Zhou P, Li X Z, et al. Distinct Holocene precipitation trends over arid Central Asia and linkages to westerlies and Asian monsoon[J]. Quaternary Science Reviews, 2021, 266: 107055, doi: 10.1016/j.quascirev.2021.107055.

[61] 周天军, 吴波, 郭准, 等. 东亚夏季风变化机理的模拟和未来变化的预估:成绩和问题、机遇和挑战[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 902-934. [Zhou Tianjun, Wu Bo, Guo Zhun, et al. A review of East Asian summer monsoon simulation and projection: Achievements and problems, oportunities and challenges[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(4): 902-934. ]

# Change characteristics of extreme precipitation events in Central Asia in recent 60 years based on RClimDex model

HUANG Xin[1], JIAO Li[1], MA Xiaofei[2], WANG Yonghui[1], Aerman ABULA[1]

(1. College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University/Xinjiang Key Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Region, Urumqi 830054, Xinjiang, China; 2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences/Research Centre for Ecology and Environment of CA, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

**Abstract:** In this study, based on the RClimDex model, we considered daily precipitation data from 126 meteorological stations in Central Asia from 1960 to 2020 to calculate eight extreme precipitation indices in Central Asia. We performed linear regression, Mann-Kendall, correlation, wavelet, and rescaled range analyses to investigate the characteristics of extreme precipitation events in Central Asia. The results revealed that: (1) The frequency and intensity of extreme precipitation events in Central Asia have increased considerably in the last 60 years. The climate trend of the simple precipitation intensity index (SDII) increased at an average of 0.02 mm·$d^{-1}$·$(10a)^{-1}$. The change tendency rates of extreme precipitation index heavy precipitation (R95p), maximum daily precipitation (Rx1day), maximum precipitation for five consecutive days (Rx5day), total annual precipitation (PRCPTOT)] were 1.93 mm·$(10a)^{-1}$, 0.24 mm·$(10a)^{-1}$, 0.66 mm·$(10a)^{-1}$, and 0.73 mm·$(10a)^{-1}$, respectively. The extreme precipitation days index [middle precipitation days (R10), continuous dry days (CDD), continuous wet days (CWD)] also exhibited a slight increase, with the exception of the number of CDD, which exhibited a decreasing trend. The change tendency rates were 0.02 d·$(10a)^{-1}$, −0.65 d·$(10a)^{-1}$, and 0.08 d·$(10a)^{-1}$, respectively. Extreme precipitation exhibit obvious spatial variability and high altitude dependence and occur frequently near highlands and mountains. The extreme precipitation cycle in Central Asia is characterized by a multipeaked spectrum with short-period oscillations of approximately 5 years, medium-period oscillations of 6−9 years, and long-period oscillations of 10−15 years. (2) The extreme precipitation index exhibits an excellent correlation with the total annual precipitation, and CWD contributes most to the total annual precipitation. The Pacific interdecadal oscillation (PDO) and the North Atlantic interdecadal oscillation (AMO) exhibit significant positive correlation with extreme precipitation events. Both PDO and AMO are the primary climate system internal variability modes that affect abrupt changes in extreme precipitation in Central Asia. The results of the R/S analysis indicates that in the future, the indices of PRCPTOT R95p, Rx1day, Rx5day, SDII, and CWD are likely to continue to increase in the future with high persistence, whereas CDD is likely to continue to exhibit a decreasing trend with average persistence. This study can provide a scientific basis for the extreme climate prediction, natural environment protection, disaster prevention, and mitigation in Central Asia.

**Key words:** extreme precipitation; spatial distribution; correlation analysis; wavelet analysis; Central Asia